

プロジェクト事後評価報告書

評価委員会開催日：平成24年2月3日

評価委員：（敬称略、五十音順）

加藤隆史 東京大学大学院 工学系研究科 教授

河本邦仁 名古屋大学大学院 工学研究科 教授

宮山 勝 東京大学 先端科学技術研究センター 教授

確定年月日：平成24年3月23日

プロジェクト名	ナノチューブ・ナノシートの創製と機能発現に関する研究
研究責任者の所属・役職・氏名	国際ナノアーキテクトニクス研究拠点 ナノマテリアル分野コーディネーター (元ナノスケール物質領域コーディネーター) 佐々木高義
実施期間	平成18年度～平成22年度
研究目的と意義	本研究はこれまで系統的な探索がなされてこなかった無機セラミックス系において、優れた電子的・磁氣的・光学的・化学的機能を持った新規ナノチューブ、ナノシートを発掘、開拓することを、第一の目標としたものである。これにより、一次元ならびに二次元ナノスケール物質のライブラリーを充実させるとともに、その組成、構造、物性の体系的な理解を進めることにより、ナノ物質科学の発展に貢献することを目指した。さらに合成されるナノチューブ、ナノシートを機能ビルディングブロックとして、ナノレベルで集積化、複合化するプロセスを開発し、これによりエレクトロニクス、情報通信技術、環境・エネルギー関連分野の発展に役立つことが期待される新材料や新技術を創出することを目的とした。
研究内容	BNナノチューブの大量・高純度合成を目指したCVD（化学気相成長）プロセスの開発を行うとともに、SiC, ZnO, ZnSなどの半導体特性が期待されるナノチューブの合成を行った。一方、各種層状遷移金属酸化物ならびに水酸化物を合成・単層剥離して、電子的・磁氣的機能に優れたナノシートの合成を行った。得られたナノチューブ、ナノシートの構造を解明するとともに、電気的、磁氣的、機械的、光学的など広範な機能性の評価を行った。さらにBNナノチューブとポリマーなどの複合化を検討し、熱伝導性、機械的特性などに優れたナノコンポジット材料の開発を目指した。またTiやNb酸化物ナノシートを室温溶液プロセスにより累積し、厚さ10 nm前後の極薄領域で高誘電性（比誘電率 >100）を発揮する多層超薄膜や紫外光に応答して動作する磁性超薄膜の合成を検討した。
ミッションステートメント（具体的な達成目標）	ナノチューブでは、従来合成が困難とされてきたSiC, ZnO, ZnSなどのワイドバンドギャップ半導体特性を有する新規ナノチューブを探索・創製するとともに、BNナノチューブの高純度・大量合成技術を確立し、それらナノチューブとポリマー等とのナノコンポジット化を実現する。 またナノシートでは、層状遷移金属酸化物ならびに水酸化物をソフト化学手法により単層剥離し、強磁性、誘電性、レドックス性を示す新規酸化物及び水酸化物ナノシートを創製する。さらにそれらナノシートを精密に集積化する液相プロセスを確立する。これにより、ナノレベルの薄さでも機能するhigh-k（高誘電率）材料、紫外光に応答して動作する透明磁性薄膜など、単一の物質・材料では実現困難な新しい電子的・磁氣的機能を有するナノ複合材料を開発する。
平成18年度～平成22年度までの主な研究成果（アウトプット）及び研究成果から生み出された（生み出される）効果・効用（アウトカム）、波及効果（インパクト）	1) 主な研究成果（アウトプット）： 新規ナノチューブ、ナノシートの探索においては、1) 小口径・高純度BNナノチューブの大量合成法（1g/日）の確立、2) ZnO, ZnS, Ga ₂ O ₃ などナノチューブ、ナノワイヤーの合成、3) Ti, Nb, Ta, Wなどをベースとした酸化物ナノシートの合成、4) 遷移金属や希土類元素（Co, Fe, Euなど）からなる水酸化物ナノシートの合成などを達成し、約30種類の新物質を発掘した。さらにこれらの構造、機能を詳細に解明し、組成、構造、ナノ形状に依存して、特異な電子的・磁氣的・光学的・熱的・化学的特性を発現することを明らかにした。この物性研究の中で、BNナノチューブが機械的変形により電気的特性が変化すること、Ti系酸化物

	<p>ナノシートが異常ともいえる熱安定性を示すこと等、これまで知られていなかった挙動や現象を多数発見した。</p> <p>一方、得られたナノチューブ、ナノシートをベースとした新材料の創製や応用に関しては、1) BN ナノチューブの表面を有機分子で修飾してポリマー中に分散させるプロセスを確立し、高熱伝導性、電気的絶縁性、透明性を併せ持ったナノコンポジットの開発、2) 厚さ5~10 nmで既存材料を大きく上回る高い誘電・絶縁性能（比誘電率：200超、リーク電流密度：10^{-7} A cm^{-2}以下（1 V印加））を発揮する酸化物ナノシート膜の創製、3) 紫外~可視光に 응답して 10^5 deg cm^{-1}に及ぶ巨大な磁気光学効果を示す透明ナノシート膜の創製、4) ガラス、プラスチックなど汎用基材上に各種機能性結晶薄膜（TiO_2, ZnO, SrTiO_3など）を高品位・配向成長させることを可能とするナノシートシード法の創出などを達成し、現行材料・技術では不可能もしくは大きく上回る性能、作用を実現した。</p> <p>2) 研究成果から生み出された（生み出される）効果・効用（アウトカム）、波及効果（インパクト）：</p> <p>本研究で合成に成功した新規ナノチューブ、ナノシートは、その特異な形状を反映して優れた電子的・磁氣的・光学的機能を示すことが明らかになるとともに、新しい機能、現象も多く見出された。これらのナノチューブ、ナノシートは、様々な新展開をもたらす可能性を秘めたユニークな機能性ナノ物質群として将来にわたって重用でき、ナノ物質科学、物性科学の発展に貢献すると考えられる。一方、得られたナノチューブ、ナノシートをベースとして創出された新材料、新技術（BN ナノチューブ/ポリマーナノコンポジット、high-k ナノシート膜、透明磁性ナノシート膜、ナノシートシード技術など）は、エレクトロニクス、情報通信技術分野などに大きな波及効果が期待できる成果であり、すでに複数の企業との実用化を視野に入れた共同研究に発展している。</p>
<p>プロジェクトの目標の達成度合い及び自己点検・評価</p>	<p>プロジェクトの目標の達成度合い： 目標を大きく上回る達成度を得た。</p> <p>自己点検・評価： 当初計画を上回る約30種類の新規ナノチューブ、ナノシートを酸化物、窒化物、水酸化物など広範な物質系で創製し、それらがナノスケールでの特異な形状を反映した優れた機能を示すことを明らかにした。さらに得られたナノチューブ、ナノシートを様々に集積化、複合化することにより、多彩な機能性材料の創製に成功した。特にBN/ポリマーナノコンポジット、high-k ナノシート膜、透明磁性ナノシート膜はいずれも既存材料にはない性能、特徴を実現しており、実用化を目指した民間企業との共同開発に進展した。さらには層状希土類水酸化物の発見とそのナノシート化、汎用基材上でも高品位結晶薄膜を成長させることが可能なナノシートシード層技術の創出など、当初計画にはなかった成果も多数得られており、目標を大きく上回る達成度を得たと認識している。</p>
<p>【評価項目】</p>	<p>コメント</p>
<p>①研究計画、実施体制、マネジメント、連携 (計画はきめ細かったか、ロードマップに問題はなかったか、実施体制は十分だったか、マネジメントの是非、連携の範囲や連携課題、連携の成果はどうだったか、どこが問題なのか、ほか)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・計画はよく練られており着実な優れた進展が見られる。 ・基礎研究を重点として実施する計画とロードマップは適切であり、その実施も機能的に行われている。 ・ポリマーとのコンポジット化などの新しい展開も進められている。 ・実施体制、マネジメントは問題ない。素晴らしいと感じる。 ・マネジメントもよくなされている。 ・他組織との連携も十分に行われ、多くの成果を得ている。 ・企業との連携も進んでおり、基礎から応用まで展開した優れた研究であると考えられる。 ・国内外の大学、企業と連携して共同研究を進め、足りないところを補い、また強みの部分を助長しながら、単独では得られない成果を数多く挙げている。

<p>②研究開発の進捗状況及び具体的目標の達成度 (研究責任者の自己点検・評価を踏まえて、進み具合はどうだったか、目標は達成されたか、目標は具体的であったか、世界レベルで見て目標は高かったか・低かったか、問題点は何か、ほか)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・目標は十分に高いレベルで設定され、世界レベルの研究が進み、目標が十分に達成されたと考えられる。 ・オリジナリティーのある研究結果が多く得られ、目標を上回る成果が得られている。 ・ナノシートの創製と機能開発の研究は、目標以上の成果が挙がっており、材料科学分野での波及効果は応用も含めて極めて大きい。 ・アルカリ土類金属ナイオベートのナノシート積層膜で既存のhigh-k材料よりもはるかに高い比誘電率を達成した成果は圧巻である。将来の応用展開が大いに期待される。 ・新規のナノチューブ・ナノシートの開拓に加えて、実用化に繋がる大量合成法の開発やコンポジット形成技術についても重要な成果が得られている。 ・BNナノチューブの大量合成に成功している点も評価されるが、放熱基板としての応用に耐え得るものができているか不明である。 ・レドックス性ナノシートの合成には一定の成果を収めているが、特性評価の結果を踏まえた今後の展開が未知である。蓄電池への応用へ持っていけるだろうか？ 	
<p>③論文・特許等の直接の成果（アウトプット）、効果・効用（アウトカム）、波及効果（インパクト） (世界レベルの質の成果が出たか、どのような効果・効用あるいは波及効果が出たか（期待されるか）、研究タイプを考慮した費用対効果は、問題点は何か、ほか)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・質の高い多くのアウトプットを生んでいる。 ・材料科学及び化学関係の一流ジャーナルに多数の優れた論文が発表され、被引用回数の多い論文も多々見られる。多くの解説・総説の執筆も依頼されている。質の高い、分野を先導する成果が出されている。 ・一流国際ジャーナルへの成果発表が多数なされており、いくつもの成果が表紙カバーを飾るなど高い評価を受けている。世界レベルの質を持った研究成果の証といえる。 ・いくつかの成果が企業との共同研究、競争的資金の獲得などに繋がっており、費用対効果は高いといえる。 ・今後、さまざまな形での研究成果の展開（アウトカム）が進むと思われる。 	
<p>④総合評価 (研究全体に対する総合的所見、及び上記評価項目①～③に含まれない、その他の評価ポイントがあれば追加してコメント)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・全体として世界に先駆ける研究成果を数多く得ており、高く評価できる。 ・ナノ物質科学の進展を促進する優れた成果を得ている。 ・優れた材料の合成技術と構造制御技術により、様々な機能材料に展開して、世界を先導する成果を挙げている。 ・NIMSの名を世界に轟かせる役割を十分果たしており、オンリーワンの研究の旗頭として今後も世界をリードすることが期待される。 ・研究成果を的確に把握し、今後の展開・計画を適切に検討している。 ・今後もさらに有機材料との機能的複合化などの新しい展開が期待される。 ・優秀な若手が育成されている。 ・機関統合が行われたとしても、他では類似の研究は行われていないので、独自路線をキープして発展して行って欲しい。 	
<p>各委員の総合評価点 (10点満点)</p>	<p>9、9、9</p>	
<p>総合評価点平均 (10点満点)</p>	<p>9.0</p>	
<p>総合評価点</p>	<p>評価</p>	<p>評価基準</p>
<p>10</p>	<p>S</p>	<p>全ての点において模範的に優れていた。</p>
<p>9</p>		<p>多くの点において非常に優れていた。</p>
<p>8</p>	<p>A</p>	<p>総合的に優れていた。</p>
<p>7</p>		<p>優れたプロジェクトであった。</p>
<p>6</p>		<p>平均的なプロジェクトであった。</p>

5	B	一部の計画の見直しが必要であった。
4		期待されたほどではなかった。
3		計画を見直して継続すべきであった。
2	C	プロジェクトの見直し、計画の抜本的な変更が必要であった。
1		大きな問題があり、プロジェクトを中止すべきであった。